

Qualitative approach to understand irradiation growth behavior of ODS ATF Fuel



2021. 5. 12

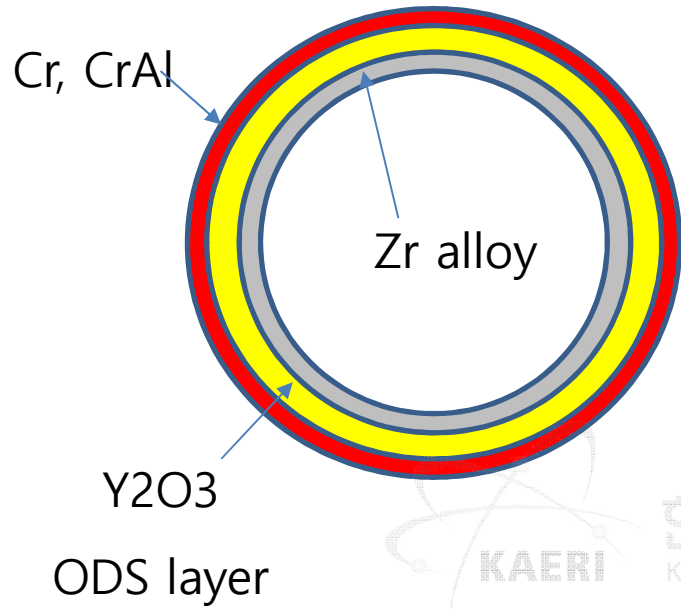
Yong Sik Yang, Jong Dae Hong, Jae Yong Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

연구 수행 배경 : PIRT for ATF

- 사고저항성핵연료(ATF) PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table) 준비
- 2012년 이후 사고저항성핵연료(ATF) 개발 경험을 정리하여, ATF 상용화, 인허가 등에 참고할 수 있는 기록 유지 목표
 - 정상 조건
 - 응력/변형율, 중심온도, 과열, 봉내압, 산화 및 수소화, 함몰, 조사성장 등
 - LB-LOCA : PCT, ECR, 수소 발생 등
 - REA : Enthalpy rise, Maximum enthalpy 등
- 특정 노형/시나리오/해석에 특화된 방식이 아닌 ATF 적용 시 고려가 필요한 주요 현상 관점에서 중요성(Importance)과 지식(Knowledge level)을 검토

연구 대상 핵연료 구성

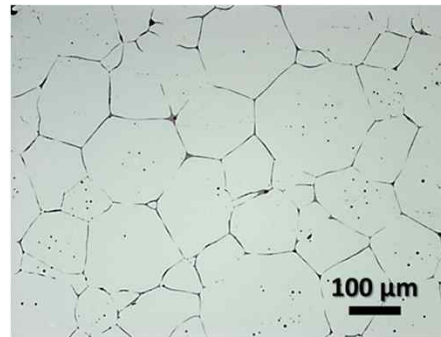


+ Mo 함유 열전도도 향상 소결체

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

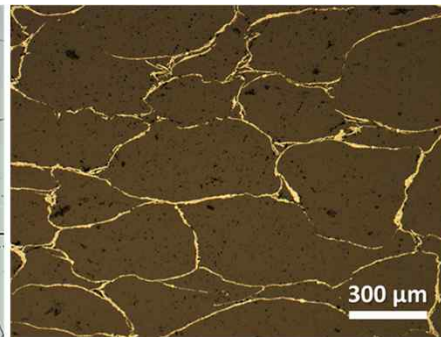


미소셀(microcell)

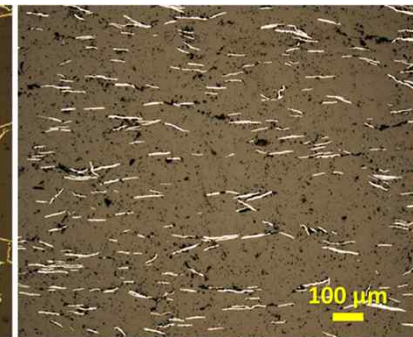


Ceramic microcell UO₂ pellet

미소판(microplate)



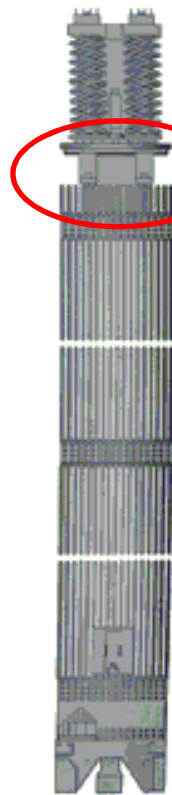
Metallic microcell UO₂ pellet



Metallic microplate UO₂ pellet

조사성장(Irradiation growth) 검토 필요성

Irradiation growth is a **change in the dimension of a zirconium alloy** reactor component even though the **applied stress is normally zero**. It is approximately a **constant volume process**, so if there is, for example, an increase in the length of a component, the width and/or thickness must decrease to maintain constant volume



**KINS/GE-N001, 경수로형 원전 안전심사지침
(개정6판, 제 2권, 허용기준, 설계기준 5항)**

핵연료봉 조사성장에 의한 상부 봉단마개와 집합체의 상부 노즐이 간섭하여 핵연료봉 힘을 발생시킬 수 있음

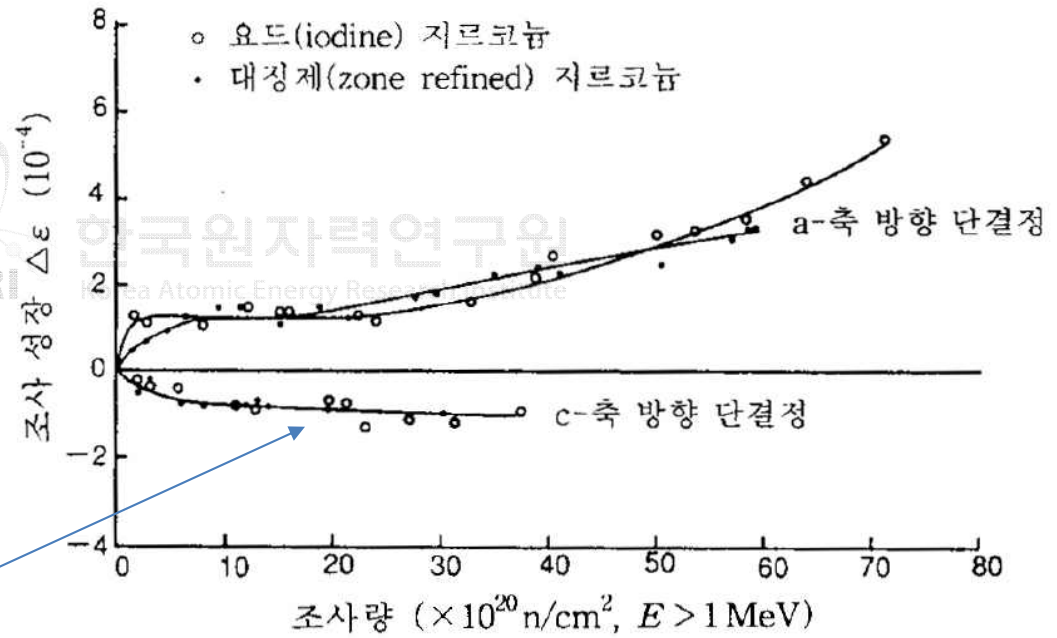
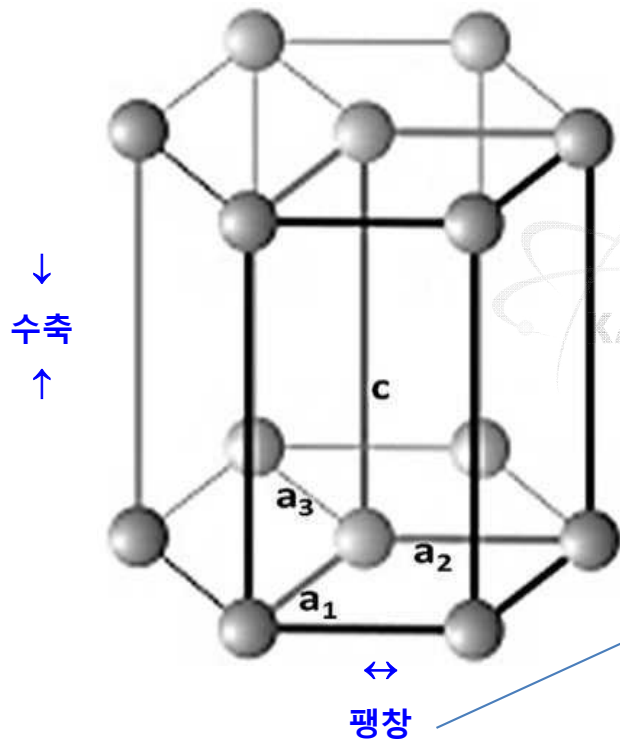
KINS/GE-N001

부록 4.2-22 혼합노심 안전성 평가지침, II 규제 입장, 2항

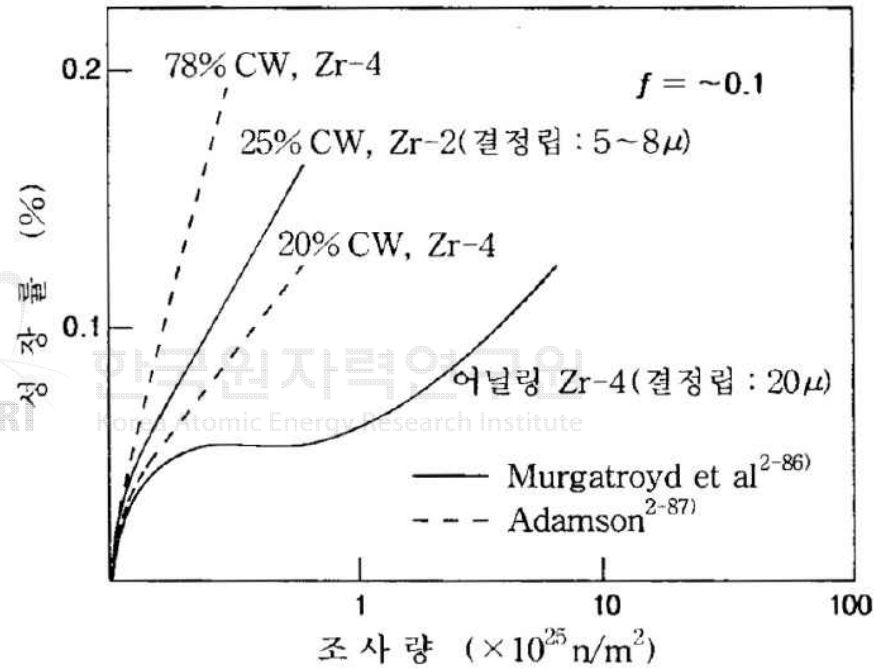
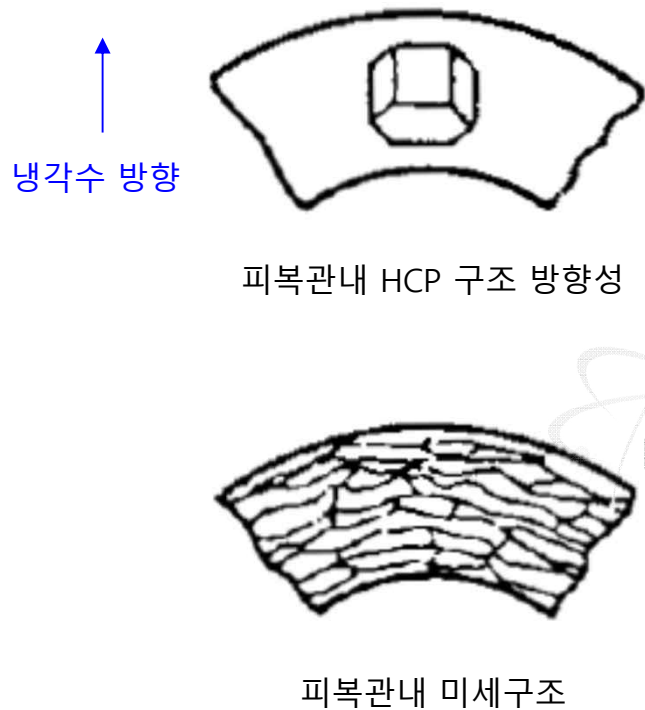
핵연료의 사양이나 재질이 통상적인 것과 다를 경우 핵연료봉 조사성장에 대한 데이터를 취득해야 함

HCP(Hexagonal Close-Packed) Structure

고속중성자에 의해 다량의 원자공공(vacancy)와 격자간원자(interstitial atom) 생성 및 이동

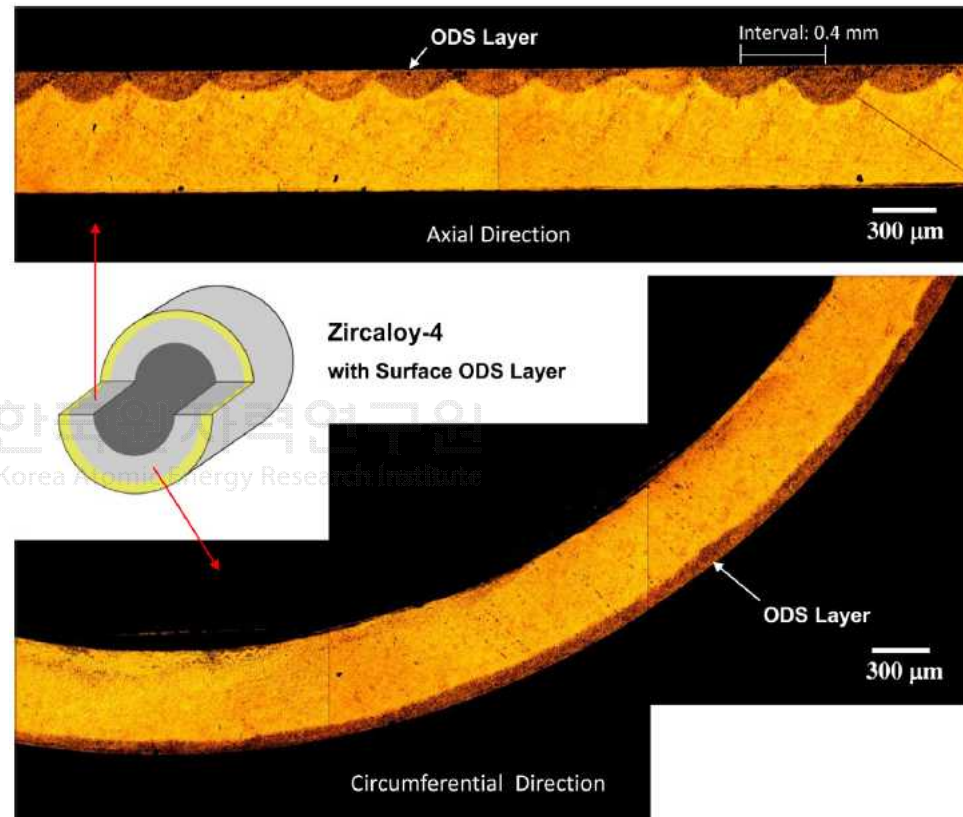
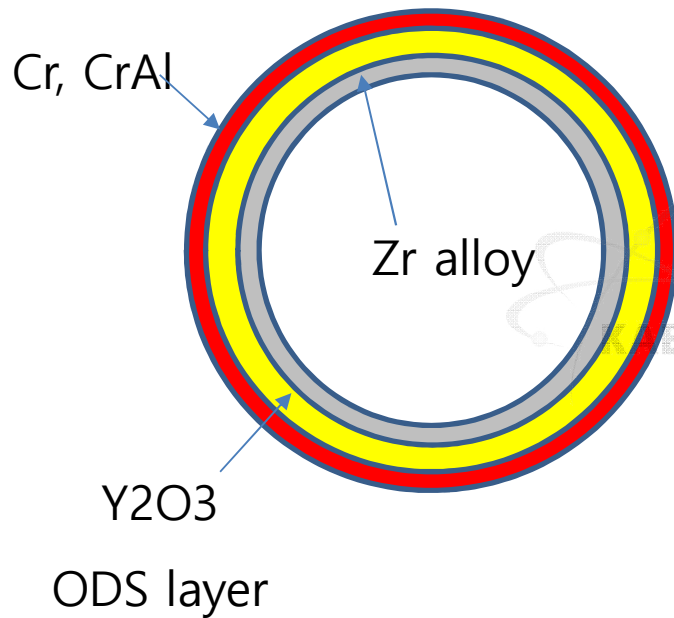


Zircaloy 합금 피복관 : 결정구조 및 미세조직



냉간가공(Coldwork) 비율이 클 수록 조사성장이 커짐

Zr-base, ODS coating, CrAl coating 피복관



Yang-Il Jung et al., "Surface treatment to form a dispersed Y2O3 layer on Zircaloy-4 tubes", *Applied Surface Science* 429 (2018) p272

ATF 조사성장 평가 : Zircaloy Base

FRAPCON irradiation growth model for Zr alloy

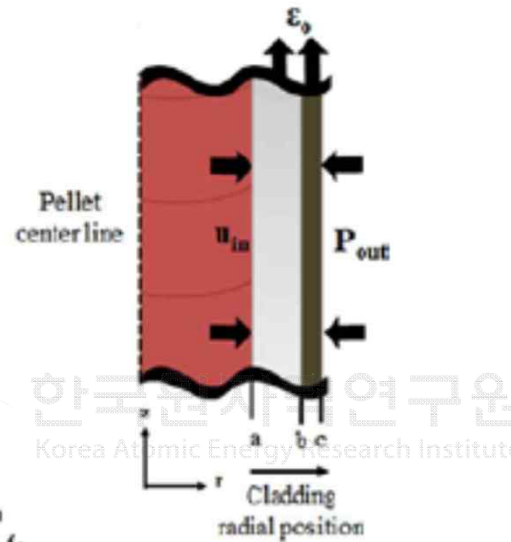
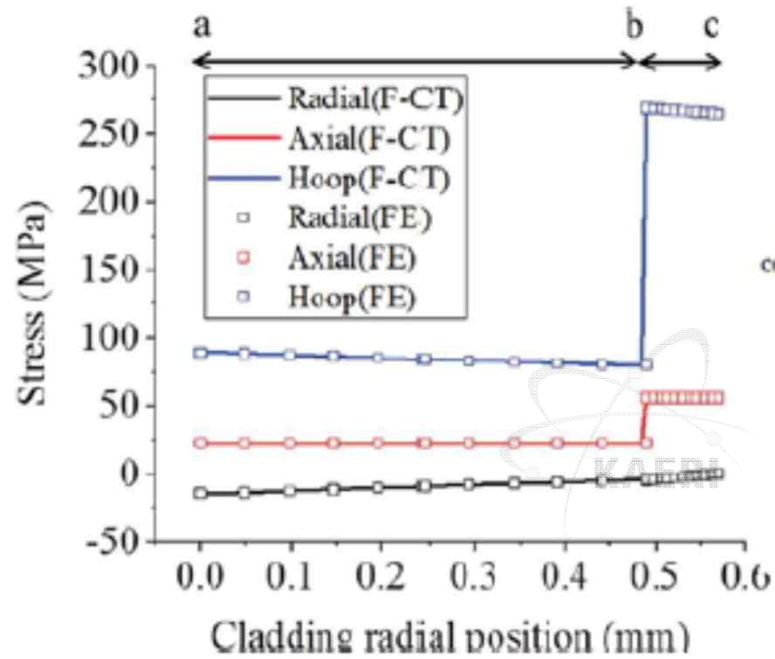
$$ax [mm/mm] = 2.1800 \times 10^{-21} \Phi^{0.845} \quad \text{for SRA}$$

$$ax [mm/mm] = 7.0130 \times 10^{-21} \Phi^{0.81787} \quad \text{for M5}$$

$$ax [mm/mm] = 9.7893 \times 10^{-25} \Phi^{0.98239} \quad \text{for Zirlo}$$

- NRC FRAPCON code는 조사성장을 고속중성자속의 함수로 표현. 합금 최종 열처리(≈Coldwork)에 따른 차이를 고려 가능
- 적용 온도 범위 : 700K~900K → ATF 핵연료 정상운전 적용 범위
- 최대 적용 연소도 및 고속중성자 조사량 : 65MWd/kgU, 12×10^{25} n/m² 이하 → ATF 핵연료 적용 영역
- Spacer grid, top/bottom nozzle과 guide tube 접합부 등 high stress 영역에서는 적용 불확실 → ATF는?

ATF 피복관 내 응력 분포의 영향

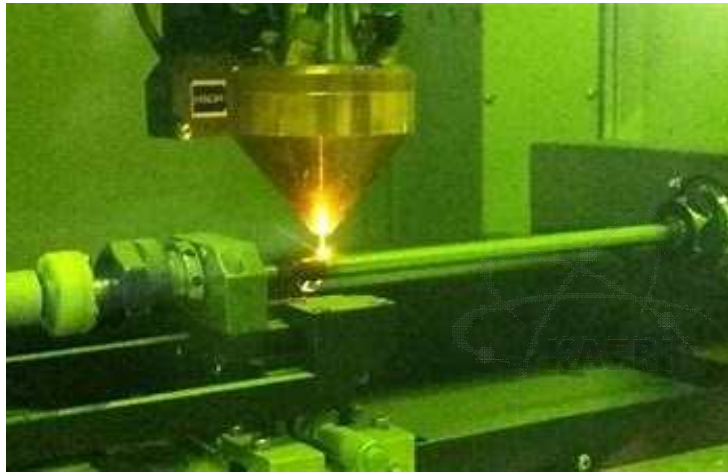


Zr base와 ODS 경계면에서
stress jump 발생
↓
이종 물질 접합면에서
연속성 유지

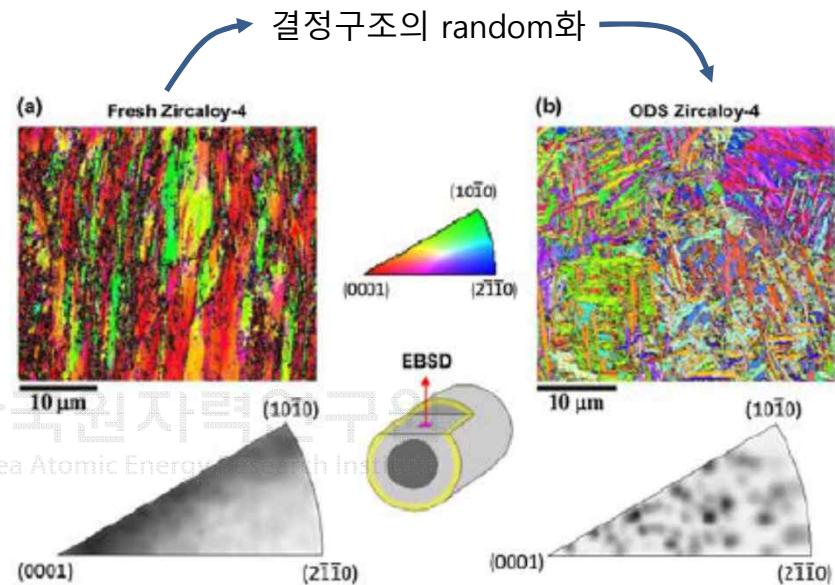
기존 조사성장 모델이 적용 가능한 응력 범위인지에 대한 검토 필요

Dong-Hyun Kim et al., "Development of FRACAS-CT module with FRAPCON4.0P01 for simulation of mechanical behaviors for accident-tolerant fuel cladding in a reactor", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol 56, 2019

3D 프린팅 기술을 이용한 ODS층 생성

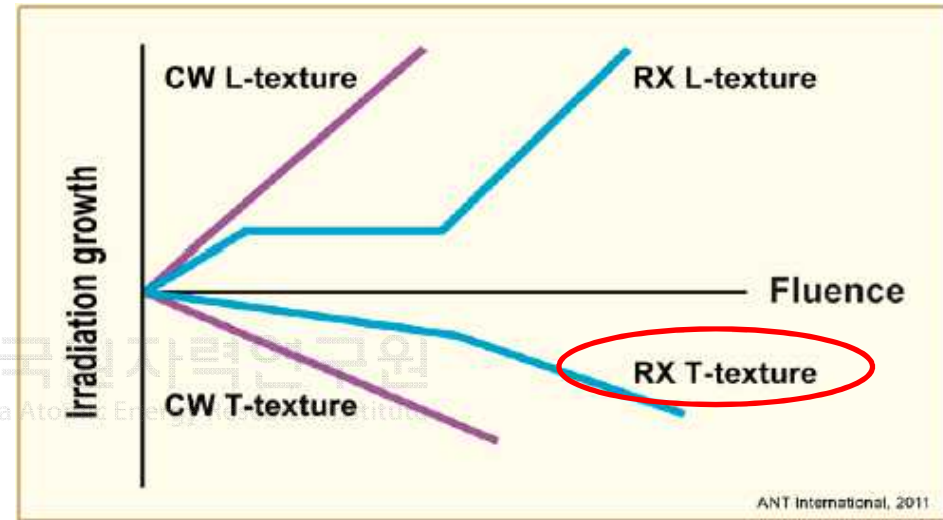
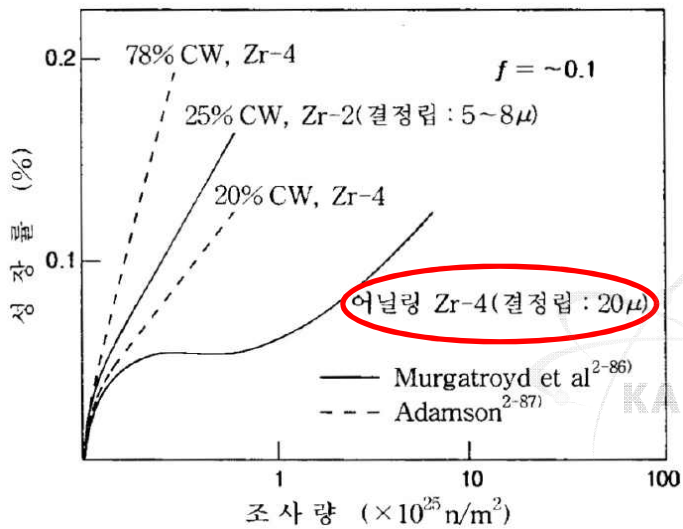


3D 프린팅을 이용한 ODS 층 생성



피복관에 국부적 열변형 구간 생성

HAZ(Heat Affected Zone)의 영향



Random한 결정구조의 조사성장은

변형전에 비해 감소

사고저항성핵연료 조사성장 검토 결론

- Zr base 층에 대한 기존 모델은 대부분 적용 가능함
- ODS 층에 대한 조사성장 데이터는 매우 부족함
- ODS 층 생성 시 발생하는 HAZ층은 조사성장을 감소시킬 것으로 예상
- CrAl의 등방성(isotropic) 특성을 고려할 때, 조사성장 없을 것으로 예상
- 결론
 - ODS 사고저항성핵연료의 조사성장은 기존 Zr 대비 감소할 것으로 판단
 - 선행 시험을 통한 데이터를 확보해야 하지만, 증가/감소 방향성은 예상 가능함.
 - 높은 응력 조건에서의 조사성장은 추가 검토가 필요함